

紫外臭氧垂直探测仪 (SBUS) 辐射定标和反演臭氧垂直廓线验证

黄富祥¹ 黄煜² Lawrence E. Flynn³ 王维和¹ 曹冬杰¹ 王淑荣²

(1 国家卫星气象中心/中国气象局遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081; 2 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033; 3 美国国家海洋与大气管理局, 美国)

摘要: 风云三号卫星 (FY-3) 是中国第二代极轨气象卫星, 紫外臭氧垂直探测仪 (SBUS) 是该卫星11个主要星载遥感仪器之一。阐述了卫星发射前和发射后紫外臭氧垂直探测仪定标、数据及产品验证的结果。主要内容包括仪器发射前的定标和特性描述、在轨监测、臭氧垂直廓线反演产品检验, 以及其产品在2011年北极严重臭氧损耗中的监测应用。紫外臭氧垂直探测仪发射前定标, 实验室定标不确定性估计大约为4.7%, 在轨监测表明漫反射板反射率252nm通道大约衰减15%, 其他11个通道大约衰减3%~5%。与美国NOAA卫星同类载荷SBUV/2s反演产品进行比较, FY-3A SBUS反演产品相对差异百分率大约为 $\pm 7\%$, 而FY-3B SBUS产品相对偏差百分率大约为 $\pm 6\%$ 。利用FY-3 SBUS臭氧垂直廓线监测2011年春季北极严重臭氧损耗, 表明从对流层上层到平流层下部的臭氧损耗占臭氧总量损耗的70%~80%。

关键词: 定标, 风云三号卫星, 臭氧垂直廓线, 紫外臭氧垂直探测仪

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.011

Radiometric Calibration of the Solar Backscatter Ultraviolet Sounder and Validation of Ozone Profile Retrievals

Huang Fuxiang¹, Huang Yu², Lawrence E. Flynn³, Wang Weihe¹, Cao Dongjie¹, Wang Shurong²

(1 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033

3 National Oceanic and Atmospheric Administration, Camp Springs, MD 20746, USA)

Abstract: The Solar Backscatter Ultraviolet Sounder (SBUS) is one of the 11 main payload instruments onboard Feng Yun-3 (FY-3), the second generation of Chinese polar orbit meteorological satellites. This paper presents the results of SBUS instrument calibration, and data and product validation during the prelaunch and postlaunch periods. Topics include the instrument of the ozone profiles retrieved from the FY-3 SBUS measurements, and an application of the retrievals to monitoring the 2011 Arctic ozone depletion. For the prelaunch calibration of SBUS, the estimated uncertainty of laboratory calibration is approximately 4.7%. The in-orbit solar irradiance measurements indicate that the diffuser reflectivity degraded approximately 15% for the 252-nm channel, and 3% to 5% for the other 11 channels during a 12-mo period. Using ozone vertical profiles retrieved from National Oceanic and Atmospheric Administration Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV)/2s as a "truth," the initial comparison of ozone profiles between FY-3 SBUS and SBUV/2s finds that the relative percent bias of the FY-3 SBUS with the SBUV/2 results is good. The averaged differences range over to $\pm 7\%$ for FY-3A SBUS and $\pm 6\%$ for FY-3B SBUS. The SBUS ozone profile retrievals reveal that the spring 2011 Arctic ozone depletion mainly resulted from a sharp ozone decrease in the upper troposphere to lower stratosphere, which accounts for 70% to 80% of the total ozone loss.

Keywords: Calibration, Feng Yun-3 (FY-3) satellite, ozone vertical profile, Solar Backscatter Ultraviolet Sounder (SBUS)

收稿日期: 2013年4月7日; 修回日期: 2013年6月12日
第一作者: 黄富祥 (1967—), Email: huangfx@cma.gov.cn
资助信息: 国家自然科学基金资助项目 (40975016); 国家重点基础研究发展计划 (973计划) 项目 (2010CB951600)

1 引言

臭氧是大气一种非常重要的引人关注的大气成分。分布于大气不同高度层上的臭氧在人类和地球环境中扮演着不同的角色。平流层臭氧占大气臭氧总量的90%, 强烈吸收对生物有害的紫外辐射, 阻止有害

的太阳辐射到达地面,也在光化学、大气加热和能量平衡等方面发挥重要作用。对流层臭氧约占大气臭氧总量的10%,是一种重要的温室气体^[1-5]。人类活动从两个方面影响大气中臭氧浓度:导致平流层臭氧含量减小和对流层臭氧含量增加^[1,6,7]。平流层和对流层臭氧含量的变化,对气候变化和全球环境都产生重要影响。对全球平流层臭氧损耗和对流层臭氧增加的可靠评估,依赖于对全球臭氧总量及其垂直分布变化的长期精确监测^[5,8,9]。为了建立可靠的全球臭氧垂直廓线数据集,卫星遥感监测与地基观测相比有着十分突出的优势,卫星观测能够获得几乎覆盖全球的观测数据,而地基观测则只能获得一个点的数据^[10-15]。美国极轨卫星太阳紫外后向散射探测仪(SBUV及其改进型号SBUV/2)积累了近40年全球臭氧垂直廓线数据^[4,16,17]。

利用太阳紫外后向散射技术遥感大气臭氧,第一次是由美国国家航空航天局(NASA) Nimbus-4卫星携带的探测器BUV实现的,1978年NASA Nimbus-7卫星再次携带的SBUV继续开展这项使命^[16]。此后,NOAA卫星臭氧观测始于1985年NOAA-9卫星SBUV/2的星载,自从那以来,NOAA极轨系列卫星先后携带了多个SBUV/2仪器。所有这些载荷为监测全球大气臭氧垂直分布的时空变化提供了重要信息^[14,16,17]。目前,由NOAA-16,17,18和19携带在轨业务运行的SBUV/2仪器还有4个。

中国先后于2008和2010年成功发射的FY-3A和FY-3B卫星,均携带有卫星紫外臭氧垂直探测仪(SBUS)^[17-19]。FY-3 SBUS是中国首个卫星臭氧探测仪^[18],目的在于获得短期和长期全球臭氧垂直分布变化的观测数据。FY-3 SBUS的光谱通道和空间分辨率等都与NOAA SBUV/2类似^[18]。FY-3A SBUS由于机械故障在2008年11月停止工作,而FY-3B SBUS目前仍在正常工作。本文将重点介绍FY-3B SBUS仪器定标及产品生成与验证情况。

本文首先介绍FY-3B SBUS仪器特性,包括发射前定标和在轨监测。其次,介绍了利用FY-3B SBUS观测数据反演生成臭氧垂直廓线产品及对产品状况的初步评估。最后,介绍综合利用FY-3B SBUS和NOAA SBUV/2臭氧垂直廓线产品监测2011年春季北极严重臭氧损耗的应用实例。

2 仪器介绍

FY-3 SBUS是一个双单色仪,只观测天底一个方向。在轨有三种观测模式:(1)地球观测模式,(2)太阳观测模式,(3)标准灯模式。在地球观测

模式下,SBUS以设置在250~340nm波段的12个波长通道观测大气紫外后向散射辐射亮度,各通道带宽为1.1nm,三角带通。波长参数见表1。

仪器在64s内依次扫过12个观测通道,地球瞬时视场约为200km×200km(IFOV)。当卫星进入极区时,SBUS进行太阳观测模式。太阳辐照度观测有两种方式:(1)每周一次的12个通道太阳辐照度观测,称为太阳分立光谱辐照度观测;(2)每月一次160~400nm波段太阳辐照度连续观测,称为太阳连续光谱辐照度测量。在太阳分立谱观测下,SBUS在64s内扫过12个通道。在连续谱观测下,光栅驱动凸轮以0.035nm步进、0.21nm光谱间隔,完成一个从160~400.3nm的扫描用时114.4s。太阳辐照度观测时,漫反射板移入光路,太阳光经漫反射板进入探测器。由于大气臭氧反演使用的是大气辐亮度与太阳辐照度之间的比率,仪器光学特性变化在两种观测中产生的影响相互抵消而不须考虑^[16,17]。但是,监测漫反射板反射率的衰减状况对于保证臭氧垂直廓线反演精度非常重要。为此,SBUS设置了两个漫反射板和汞灯。标准灯模式通过汞特征谱线位置对比,监测仪器波长变化。两个漫反射板一个是工作板,用于太阳辐照度观测,另一个是参考板,使用频率相对较低,用以比较和监测工作板性能衰变。在SBUS单色仪中有两个探测器:一个是R1689-02Mod光电倍增管主探测器,另一个是541N-05M-13光电倍增管参考探测器。光谱分配器将各个通道的辐射分成两个光路分别进入不同探测器。参考探测器每月使用一次用于监测光电倍增管的增益变化,同时也是主探测器的一个备份。

正常观测过程中,SBUS随着卫星在轨道上移动逐一扫描12个通道,相邻通道瞬时视场间大概存在34km缺口。为了考察观测目标反射率的变化,SBUS设置了一个独立的云盖光度计,与单色仪的各通道观测进行同步观测,云盖光度计的波长和半高宽度见表1。

表1 FY-3 SBUS通道光谱参数

通道	中心波长 (nm)	半值全宽 (nm)
1	252.00±0.05	
2	273.62±0.05	
3	283.10±0.05	
4	287.70±0.05	
5	292.29±0.05	
6	297.59±0.05	
7	301.97±0.05	1+0.2
8	305.87±0.05	
9	312.57±0.05	
10	317.56±0.05	
11	331.26±0.05	
12	339.89±0.05	
光度计	379.00±1.00	3+0.3

3 SBUS的定标

由于FY-3 SBUS没有星上定标光源（汞灯除外），它的定标由两部分组成：发射前实验室定标和在轨漫反射板衰减监测。

3.1 发射前定标

进行发射前定标，选择由日本滨松公司生产150W高稳定性水冷氙灯L1835，MgF₂窗口，工作波段115~400nm，预热30min后，稳定性可优于0.03%·h⁻¹[20]。以标准光源+球面镜构建平行光光谱辐照度定标单元。该单元由150W氙灯及焦长500mm、口径60mm×60mm反射镜构成，镜表面镀Al+MgF₂。氙灯处于反射镜焦点，形成60mm准直光束。氙灯与反射镜中心高度及角度装调好后固定于同一基座以保证两者相对位置不再改变。

在此定标单元中，由于氙灯与反射镜之间夹角的存在，轻微的像散会被引入到准直光束中，从而导致接收面上照度不均匀。理论上两者夹角越小越好，可是由于氙灯本身有一定的尺寸，角度太小会挡光，实际使用中夹角为15°。为了考察此定标单元输出的均匀性，以硅探测器和峰值波长254nm滤光片所构成的辐射计实测了准直光束中心40mm光斑面积内8个采样点相对照度值，测量结果表明其照度均匀性优于0.3%，因此，像散的影响可以忽略不计。

输出的光谱辐照度 $E_c(\lambda)$ 为：

$$E_c(\lambda) = E_D(\lambda) \cdot \varpi_m(\lambda) \quad (1)$$

其中， $E_D(\lambda)$ 是准直光束光谱辐照度， $\varpi_m(\lambda)$ 是球面反射镜光谱反射率。

从(1)中可见只要知道 $E_D(\lambda)$ 和 $\varpi_m(\lambda)$ 就可以确定准直光束光谱辐照度，其中定标光源的光谱辐照度已知，但是，要准确测定球面反射镜的光谱反射率是相当困难的。采用照度传递方法得到准直光的光谱辐照度，避开球面镜光谱反射率的难题。

以Mcpherson 2253M5真空紫外单色仪为基础构建了光谱辐照度传递系统。所用凹面光栅曲率半径是3m，刻线密度1200行/mm，刻线面积65mm×104mm，光栅在220nm处闪耀，波长精度

±0.01nm，波长重复性0.01nm。探测器是美国EMR公司541N-05M-13型蓝宝石窗口光电倍增管。单色仪狭缝前50mm处安置石英透射漫射板，用来补偿标准光源与待标定光源由于几何尺寸不同导致的照明条件差异。石英漫射板前加φ8mm视场光阑，用来限制接收立体角。标准光源与待标定光源均位于石英漫射板前500mm处。

30W标准氙灯经过德国物理技术研究院（PTB）在同步辐射BESSY II上标定了光谱辐亮度和辐照度[21]。

如图1所示，lamp-A代表标准光源，lamp-B代表待传递光源，可以将标准光源定标数据直接传递给150W氙灯L1835或由L1835+准直镜构成的平行光辐照度定标单元，以后者为例详述传递过程。分别以30W氙灯和平行光光谱辐照度定标单元照明单色仪狭缝前石英透射漫射板，得到整个传递系统的照度响应度：

$$R_t(\lambda) = \frac{E_d(\lambda)}{V_d(\lambda)} = \frac{E_c(\lambda)}{V_c(\lambda)} \quad (2)$$

式中， $E_d(\lambda)$ 和 $E_c(\lambda)$ 分别是30W氙灯和平行光定标单元在石英透射漫射板处的照度值， $V_d(\lambda)$ 和 $V_c(\lambda)$ 分别是照度传递系统在两种照明方式下对应波长处的读出值。辐照度 $E_d(\lambda)$ 为：

$$E_d(\lambda) = \frac{I_d(\lambda)}{l^2} \quad (3)$$

式中， $I_d(\lambda)$ 是标准氙灯光谱辐射强度， l 为标准氙灯距离石英透射漫射板的距离。

平行光定标单元光谱辐照度值可由下式确定：

$$E_c(\lambda) = \frac{I_d(\lambda) \cdot V_c(\lambda)}{l^2 \cdot V_d(\lambda)} \quad (4)$$

获得氙灯+准直镜构成的平行光光谱辐照度定标单元光谱辐照度值后，即可用来对飞行样机在160~300nm波段间进行定标。用来标定的是一台空间遥感紫外光谱仪样机，是Ebert-Fastie型结构的双光栅光谱辐射计，工作波段160~400nm，光谱分辨率0.15nm。狭缝入口处安装一可旋入旋出的铝制漫反射板，铝漫反射板法线与仪器光轴成45°。光谱辐照度

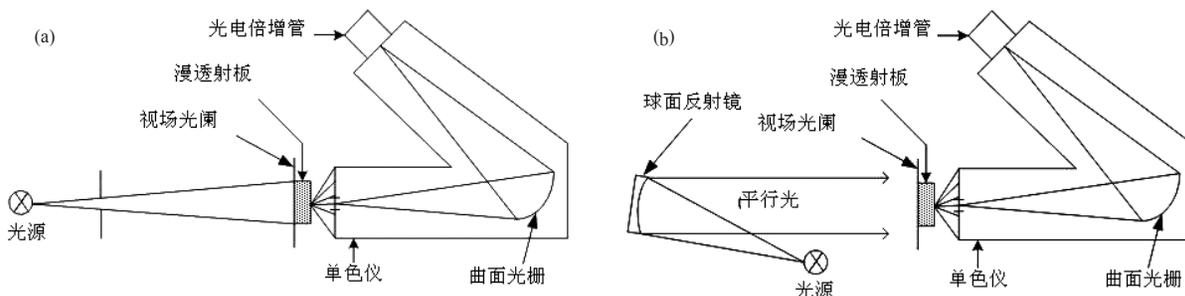


图1 SBUS辐照度定标光学图：(a) 标准灯光源；(b) 平行光入射光源

观测时，铝漫反射板移入光路，入射辐射经过铝漫反射板进入仪器的入射狭缝完成紫外光谱辐照度测量。将图1中Mcpherson 2253M5紫外—真空紫外单色仪的位置由该光谱辐射计代替即可进行光谱辐照度定标。

这样，仪器光谱辐照度响应度可表示为

$$R(\lambda) = \frac{E_c(\lambda)}{V_c'(\lambda)} = \frac{I_d(\lambda) \cdot V_c(\lambda)}{l^2 \cdot V_d(\lambda) \cdot V_c'(\lambda)} \quad (5)$$

其中， $V_c'(\lambda)$ 是光谱辐射计的响应^[20]。

定标精度估计如下：

$$\frac{\Delta R(\lambda)}{R(\lambda)} = \left(\left| \frac{\Delta V_d(\lambda)}{V_d(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_c(\lambda)}{V_c(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta V_c'(\lambda)}{V_c'(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta I_d(\lambda)}{I_d(\lambda)} \right|^2 + \left| \frac{\Delta l}{l} \right|^2 \right)^{1/2} \quad (6)$$

不同部分误差源分析见表2。

3.2 在轨监测

SBUS利用大气后向散射辐亮度和太阳辐照度比值来探测大气臭氧。两种观测在光路上的差异主要是辐照度观测时漫反射板的使用。本文使用SBUS太阳辐照度观测数据来监测仪器漫反射板在轨衰变特征^[22]。太阳辐照度观测值变化来自3个方面：一是漫反射板反射率衰减，二是仪器漫反射板以外其他光电部分的变化，三是太阳辐照度的自身变化。SBUS在波长 λ 和时刻 t 太阳辐照度观测值由下式确定：

$$F_\lambda(t) = F_\lambda(t_0) \frac{R_\lambda(t)}{R_\lambda(t_0)} S_\lambda(t) \quad (7)$$

其中， $F_\lambda(t)$ 和 $F_\lambda(t_0)$ 分别表示 t 和 t_0 时刻太阳辐照度观测值， t_0 指卫星发射后第一次观测时刻； $R_\lambda(t_0)$ 和 $R_\lambda(t)$ 分别是初始时刻 t_0 和时刻 t 漫反射板反射率； $S_\lambda(t)$ 包含除漫反射板外仪器其他部分所有变化^[22]。

FY-3 SBUS太阳辐照度观测值表达式(7)中的 $S_\lambda(t)$ 可以忽略，因为该部分的影响在太阳辐照度和大气紫外后向散射辐亮度的比值计算中相互抵消^[22]。太阳辐照度自身的变化主要来自日—地距离的变化。大气顶太阳辐照度可描述为：

$$F(t) = S_0(t) \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 \cos \theta_0, \quad (8)$$

表2 SBUS光谱响应定标的误差估计

误差来源	百分率 (%)
光谱辐照度 $I(\lambda)$ 标定不确定度	3.5
距离 L 测量误差	0.8
$V_c(\lambda)$ 的读数误差	1.0
$V_c'(\lambda)$ 的读数误差	1.0
$V_d(\lambda)$ 的读数误差	2.5
探测系统的漂移、非线性和重复性误差	1.0
估计精度	4.7

其中， S_0 是在平均日—地距离 r_0 时的太阳常数， θ_0 是太阳入射角。日—地距离 r 随时间沿椭圆轨道变化^[23]。

令 $r_0=1$ 为天文单位并在时刻 t 采用标准公式计算地球与太阳的距离。结合航天器星历和指向提供的太阳入射角 θ_0 ，可以计算理论大气顶太阳辐照度。在SBUS的观测中，太阳入射角 θ_0 在漫反射板发射前定标中进行了角度订正，无须考虑。

图2给出FY-3B SBUS自发射以来252, 298和340nm通道太阳辐照度月平均值。在2010年11月，这些数据被归一化到第一次观测值，并且也修正了日—地距离变化的影响。

从图2可见，漫反射板在252nm通道反射率衰减最大约为15%，其他11个通道衰减率在3%~5%不等。从图2中可见，2011年1月的观测数据在每个通道上都有一个小跳跃。

与波长相关的漫反射板反射率衰减参数可用模型描述为

$$r_\lambda = \frac{-1}{R_\lambda(t)} \frac{\partial R_\lambda(t)}{\partial E(t)} \quad (9)$$

其中， r_λ 是与时间无关的漫反射板反射率衰减系数， $R_\lambda(t)$ 是 t 时刻漫反射板反射率， $E(t)$ 是漫反射板反射率暴露在太阳下的时间^[22]。

计算得到参数 r_λ 后， t 时刻漫反射板反射率 $R_\lambda(t)$ 可由暴露时间 $E(t)$ 来确定：

$$R_\lambda(t) = e^{[-r_\lambda E(t)]} \quad (10)$$

为了建立模型来监测漫反射板反射率衰减，对两个漫反射板积累了太阳辐照度的测量和相应的漫反射板暴露时间。一般来说，至少需要两年的数据才能获得 r_λ 较好的估计^[22]。

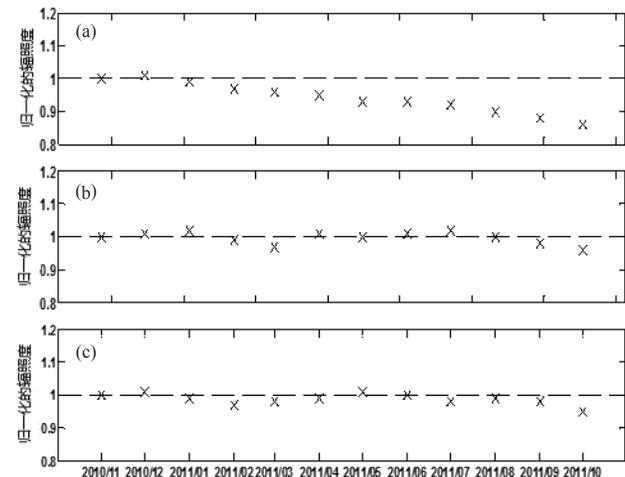


图2 SBUS太阳辐照度观测数据在不同波段的变化情况，252nm通道(a)，298nm通道(b)，340nm通道(c)上太阳辐照度经过日—地距离订正并归一化到首次观测值

4 FY-3 SBUS臭氧垂直廓线反演

4.1 算法描述

SBUV/2臭氧垂直廓线反演算法发展可以追踪到1970年代早期，那时开始利用Nimbus-4测量观测数据反演臭氧垂直廓线。自那以来，反演算法先后改进了几个版本。目前NOAA业务运行使用的算法是V8.0^[17]。

FY-3 SBUS臭氧垂直廓线反演算法研究始于2003年3月，当时国家卫星气象中心组建了一个小的臭氧垂直廓线反演团队。这个团队以SBUV/2老版本算法为参考^[14, 24-27]，在2006年末完成了一个初始算法，并利用模拟数据开展了臭氧垂直廓线反演试验^[28]。该初始算法对一些反演因素作了一些简化处理，如先验臭氧垂直廓线生成、温度廓线、收敛判据和插值计算。此后，SBUV/2 V8算法以及25年SBUV/2气候数据集被公开发布。在2006—2008年中美大气科学技术合作中，V8算法被推荐用于SBUS数据反演。2008年7月，完成了基于SBUV/2 V8的FY-3 SBUS反演算法改造和工程化，并成为FY-3 SBUS臭氧垂直廓线业务反演算法。

4.2 FY-3 SBUS 臭氧垂直廓线反演

在2008年7—8月，FY-3A星发射后，利用FY-3A SBUS观测数据开展过臭氧垂直廓线反演试验。为了评估FY-3 SBUS反演臭氧垂直廓线的精度，利用NOAA SBUV/2反演产品进行了对比分析和评估。在像元经纬度差异均不超过0.5°等匹配条件下，相同观测日期的FY-3 SBUS和NOAA SBUV/2匹配的臭氧廓线进行逐层对比，定义相对偏差百分率如下：

$$\delta_i = \frac{(X_i - Y_i)}{[(X_i + Y_i) / 2]} \times 100 \quad (11)$$

其中， $i=1, 2, \dots, 21$ ，代表反演臭氧廓线层数； δ_i 是指第 i 层SBUS和SBUV/2相对偏差百分率； X_i 与 Y_i 分别表示 i 层SBUS和SBUV/2反演臭氧廓线臭氧值^[18]。

匹配的臭氧廓线对按纬度分成3个纬度带：低纬（纬度 $<20^\circ$ ）、中纬（纬度 $20^\circ \sim 50^\circ$ ）和高纬（纬度 $50^\circ \sim 90^\circ$ ）。通过匹配像元数据筛选，低、中和高纬带分别获得132、188和570组匹配廓线。图3给出部分SBUS和SBUV/2臭氧廓线比较的情况。

图3中的曲线展示了部分FY-3A SBUS和NOAA SBUV/2s臭氧垂直廓线比较情况，横坐标为臭氧量（单位：DU），左侧纵坐标给出臭氧垂直廓线的层数，右侧纵坐标给出每层底部相应的近似气压值（单位：hPa）。比较结果显示，SBUS和SBUV/2臭氧廓线存在一定的差异，尤其是在对流层顶附近的臭氧峰

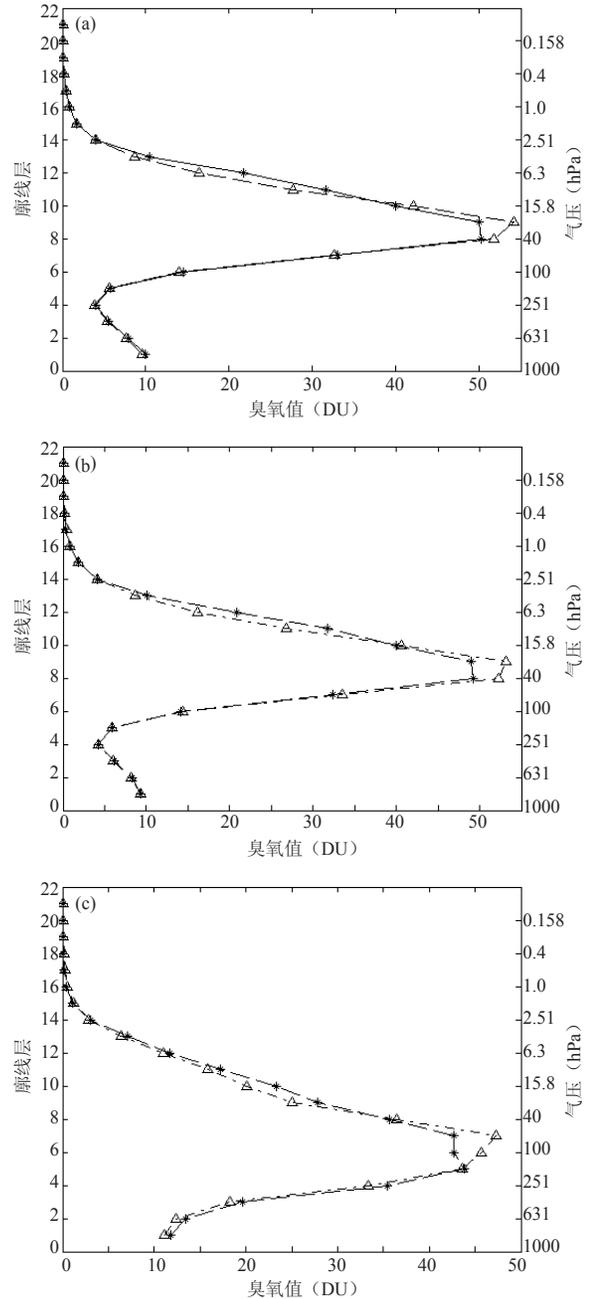


图3 FY-3A SBUS和NOAA SBUV/2匹配像元臭氧廓线比较示例 (a) FY-3A SBUS与NOAA-17 SBUV/2比较；(b) FY-3A SBUS与NOAA-16 SBUV/2比较；(c) FY-3A SBUS与NOAA-17 SBUV/2比较 (*为SBUS廓线，△为SBUV/2廓线)

值层差异较大。

表3给出了图3中比较的廓线的地理位置信息。

图4表示在2008年7—8月间3个纬度带由FY-3A的SBUS相对NOAA的SBUV/2反演的臭氧廓线的纬向平均相对偏差(%)。

三条曲线代表了一个半月内3个纬度带上对于每一廓线层的纬向平均相对偏差百分率。横轴表示由

表3 图3中比较廓线组的位置和观测日期

日期	卫星和探测器	地理位置 (°)
a	FY-3A SBUS	17.5322°N, 48.7904°E
2008年7月23日	NOAA-17 SBUV/2	17.8528°N, 48.9651°E
b	FY-3A SBUS	20.8941°N, 52.7407°E
2008年7月22日	NOAA-16 SBUV/2	20.8436°N, 52.7385°E
c	FY-3A SBUS	79.3159°N, 131.946°E
2008年7月17日	NOAA-17 SBUV/2	79.1176°N, 131.548°E

FY-3A的SBUS和NOAA的SBUV/2s反演臭氧垂直廓线的相对百分率的差异。假设以NOAA SBUV/2s反演臭氧垂直廓线为“真”值，可以看到在大部分臭氧层上FY-3A SBUS反演臭氧垂直廓线相对偏差百分率都在±7%以内。

图5给出2008年7月17日—8月30日FY-3A SBUS和NOAA SBUV/2s反演垂直廓线分别与其先验臭氧廓线之间差异的比较。曲线表示在一个半月内反演和先验垂直廓线在低纬度地区(纬度<20°)平均差异，三条曲线分别代表FY-3A SBUS, NOAA-16 SBUV/2和NOAA-17 SBUV/2。NOAA-16和NOAA-17 SBUV/2反演廓线和先验廓线差异百分率比较一致，约为10%或更小，但FY-3A SBUS反演廓线与先验廓线差异百分率与NOAA两个仪器不一致。明显的差异表现在从10到4hPa和从1.58~0.158hPa高度层。从图中可看出，FY-3A SBUS臭氧廓线在10~4hPa各层反演数据远大于气候值，而SBUV/2s反演值接近或略小于气候值。在从1.58~0.158hPa高度的各层上情况相反，即由FY-3A SBUS反演数据小于气候值，而SBUV/2s反演数据大于气候值。

2011年3月，在FY-3B卫星发射之后，利用2010年10月—2011年3月数据，对FY-3B SBUS和NOAA SBUV/2s反演的臭氧垂直廓线做了相似的比较。图6给

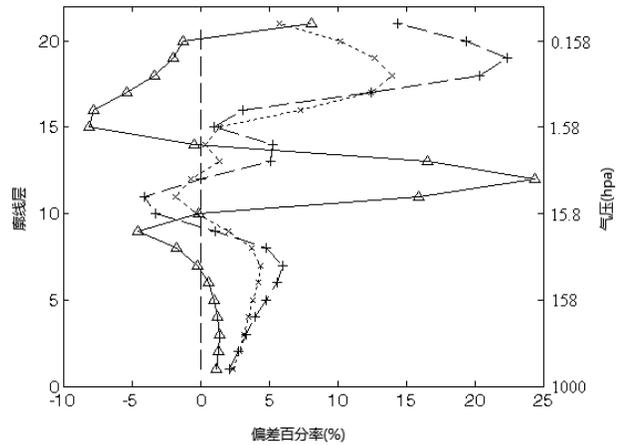


图5 FY-3A SBUS和NOAA SBUV/2s反演廓线与先验廓线的差异百分率(△为FY-3A SBUS反演廓线与先验廓线差异百分率平均值; ×为NOAA-16 SBUV/2反演廓线与先验廓线差异百分率平均值; +为NOAA-17 SBUV/2反演廓线与先验廓线差异百分率平均值)

出了比较结果。

在图4~6中，可看出SBUS和SBUV/2反演廓线间的平均相对差异很小。FY-3A SBUS与SBUV/2在大多数层上的差异在±7%内，FY-3B SBUS与SBUV/2在大多数层上的差异在±5%~6%。通过比较图4和6，可以看出与FY-3B SBUS上的相对差异在FY-3A SBUS基础上有所改进。

假设SBUV/2反演臭氧垂直廓线是“真”值，FY-3 SBUS与SBUV/2s反演臭氧垂直廓线之间的差别主要来源于3个方面：一是FY-3 SBUS与NOAA SBUV/2s两种数据存在2~5h的观测时间差异，在此时间段内大气臭氧垂直结构可能存在一定的变化；二是SBUS的测量误差。FY-3 SBUS相对辐射定标精度优

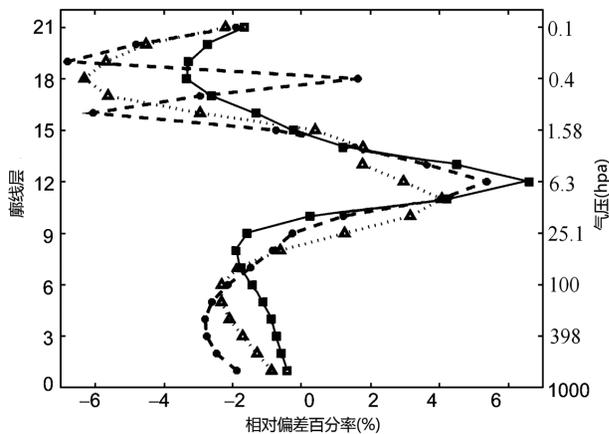


图4 FY-3A SBUS反演廓线与NOAA SBUV/2 廓线比较相对偏差百分率(■为纬度在20°以内的低纬度地区相对偏差百分率; •为纬度在20°~50°的中纬度地区相对偏差百分率; △为纬度在50°~90°的高纬度地区相对偏差百分率)

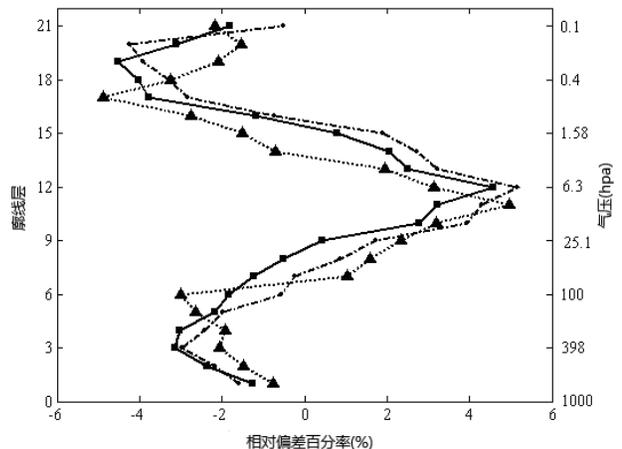


图6 FY-3B SBUS 反演廓线与NOAA SBUV/2数据比较相对偏差百分率(■为纬度在20°以内的低纬度地区相对差异百分率; •为纬度在20°~50°的中纬度地区相对偏差百分率; ▲为纬度在50°~90°高纬度地区相对偏差百分率)

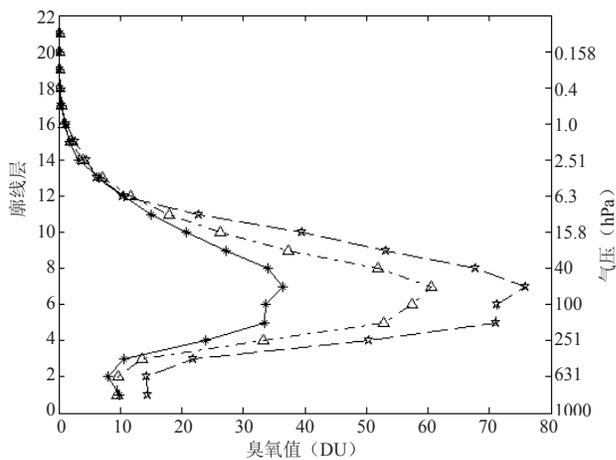


图7 臭氧损耗前后3个日期北极圈附近同一个地点臭氧垂直廓线比较 (*是3月14日臭氧损耗期间的廓线; △是损耗前3月1日臭氧廓线; ☆是臭氧损耗发生后4月8日臭氧廓线)

于2%，发射前定标不确定性大约为4.7%^[20]，SBUV/2算法敏感性研究表明在20hPa上，302nm通道1%的定标误差大约能导致臭氧廓线1.2%的误差；而在1hPa层上，252nm通道同样是1%的定标误差大约能导致臭氧廓线1.8%的误差^[29]。因此，一些误差可能来自于FY-3

SBUS的定标误差；第三个可能的差异来源是地理位置匹配的差异，也可能导致臭氧廓线的一些差异。

在SBUV/2廓线评估研究中，经常会进行纬向平均廓线与先验廓线之间的对比^[17]。在FY-3 SBUS臭氧廓线评估中，我们做了一些对SBUS和SBUV/2s臭氧廓线的初步比较。未来还将进一步开展SBUS和SBUV/2s纬向平均廓线和总臭氧时间序列比较研究。

5 利用FY-3 SBUS监测2011年春季北极严重臭氧损耗

2011年3—4月，结合FY-3 SBUS与NOAA SBUV/2s遥感数据，监测了北极地区臭氧严重损耗事件^[19]。采用SBUS和SBUV/2s臭氧总量数据得到的臭氧分布图与FY-3 TOU监测结果以及世界臭氧紫外辐射数据中心地基观测结果都具有较好一致性。

图7显示的是利用FY-3B SBUS观测数据给出的在71.11°N，77.09°E一个地点2011年3月14日臭氧垂直廓线与2011年3月1日、2011年4月8日在附近位置臭氧垂直廓线对比情况。

图7中的3条曲线分别是3月14日（臭氧损耗期间），3月1日（臭氧损耗前）及4月8日（臭氧损耗

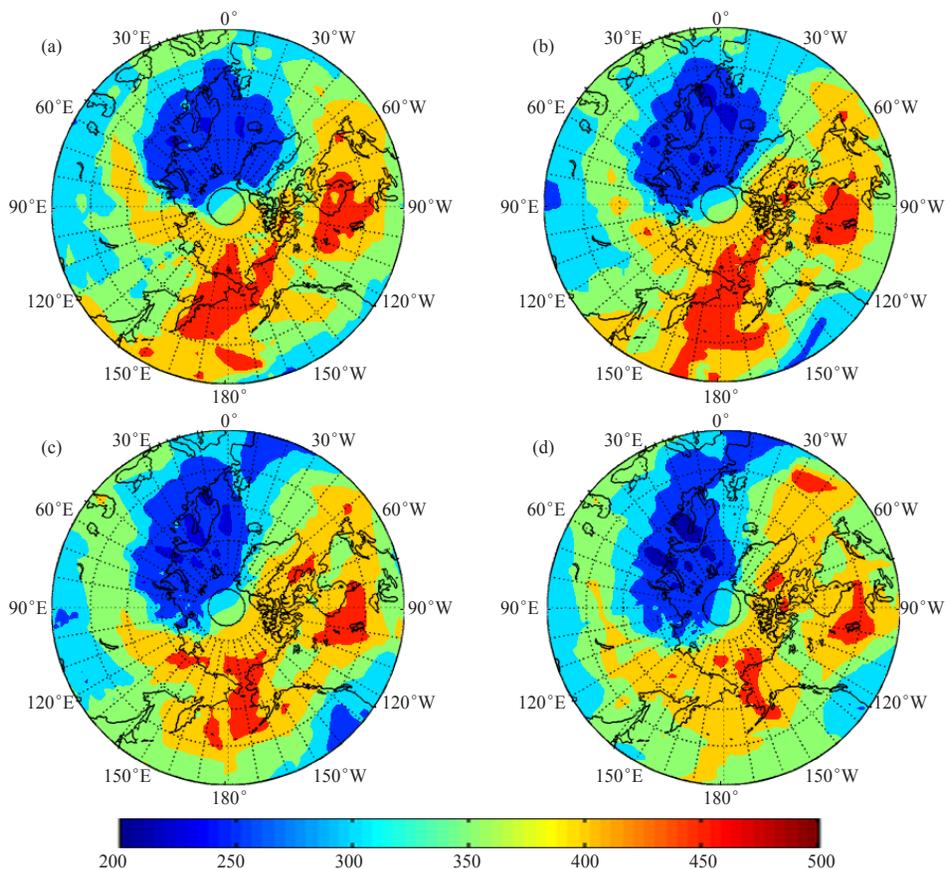


图8 2011年3月末臭氧损耗区从北极圈向低纬度地区扩展的情况 (a)，(b)，(c)和(d)分别显示3月28，29，30和31日北极臭氧损耗区分布状况

后)同一地点臭氧垂直廓线,三条廓线臭氧总量分别是396, 277和528DU。从图中可见,3月14日臭氧损耗主要是由于第4~10层、气压值在251~10hPa高度层的臭氧损耗,这个高度层对应着从对流层上层到平流层中层。在此高度层,臭氧值比正常水平大约低100DU,比高值时大约低193DU,对应着臭氧总量77%~83%的变化。表明极地臭氧损耗主要发生在从对流层上部到平流层中层这个高度层。

图8显示,3月28—31日臭氧低值区从极区扩展到几乎整个欧洲西北部、向东延伸到俄罗斯中部的广大区域。该区域臭氧总量大多在230~250DU,局地达到220DU以下,达到臭氧洞水平。图8a~d分别显示3月28, 29, 30和31日臭氧损耗区域的范围,综合使用了FY-3 SBUS和NOAA-16, 17, 18和19 SBUV/2s的数据。

6 总结

FY-3A SBUS是中国第一个卫星臭氧探测仪, FY-3B SBUS目前仍在正常运行。经过一年多的在轨运行, FY-3B SBUS离散通道太阳辐照度观测数据在252nm通道衰减了大约15%,在其他11个通道衰减了3%~5%不等。利用FY-3 SBUS观测数据,顺利反演生成了臭氧总量和臭氧垂直廓线产品,与NOAA SBUV/2s产品初步比较表明, FY-3 SBUS反演臭氧垂直廓线拥有较高的精度。FY-3A SBUS相对偏差百分率大约在±7%,而FY-3B SBUS相对偏差百分率大约在±6%。利用FY-3B SBUS观测数据监测了2011年春季北极严重臭氧损耗事件,为极区臭氧总量分布变化及其垂直结构监测提供了有价值信息。对北极圈附近同一地点臭氧垂直廓线的对比分析,表明极地臭氧总量的急剧减少主要是由于平流层臭氧的剧烈损耗造成的,在2011年春季北极严重臭氧损耗中,平流层臭氧减少占臭氧柱总量损耗的70%~80%。

参考文献

- [1] World Meteorological Organization (WMO). Scientific assessment of ozone depletion: 1998. Global Ozone Research and Monitoring Project Report. Silver Spring: NOAA Research, 1998.
- [2] World Meteorological Organization (WMO). Scientific assessment of ozone depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project Report. Silver Spring: NOAA Research, 2002.
- [3] World Meteorological Organization (WMO). Scientific assessment of ozone depletion: 2006. Global Ozone Research and Monitoring Project Report. Silver Spring: NOAA Research, 2006.
- [4] World Meteorological Organization (WMO). Scientific assessment of ozone depletion: 2010. Global Ozone Research and Monitoring Project Report. Silver Spring: NOAA Research, 2010.
- [5] Kondratyev K Y, Varotsos C. Atmospheric ozone variability: implications for climate change, human health and ecosystems. Berlin: Springer, Chichester: Praxis publ, 2000.
- [6] McCormack J P, Hood L L. The frequency and size of ozone "minihole" events at northern midlatitudes in February. *Geophys Res Lett.* 1997, 24(21): 2647-2650.

- [7] Bojkov R D, Balis D S. Characteristics of episodes with extremely low ozone values in the northern middle latitudes 1957-2000. *Ann Geophys*, 2001, 19(7): 797-807.
- [8] Orsolini Y J, Limpasuvan V. The North Atlantic Oscillation and the occurrences of ozone miniholes. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(21): 4099-4102.
- [9] Janusz W K. Long-term changes in ozone mini-hole event frequency over the Northern Hemisphere derived from ground-based measurements. *Int J Climatol*, 2002, 22(12): 1425-1439.
- [10] Farman J C, Gardiner B G, Shanklin M R. Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx: NOx interaction. *Nature*, 1985, 315(6016): 207-210.
- [11] Stolarski R S, Krueger A J, Schoeberl M R, et al. Nimbus 7 satellite measurements of the springtime Antarctic ozone decrease. *Nature*, 1986, 322: 808-811.
- [12] Bojkov R D, Fioletov V F. Estimating the global ozone characteristics during the last 30 years. *J Geophys Res*, 1995, 100(D8): 16537-16551.
- [13] 周秀骥, 罗超, 李维亮, 等. 中国地区总臭氧的变化及青藏高原的低臭氧中心. *科学通报*, 1995, 40: 1396-1398.
- [14] Randel W J, Stolarski R S, Cunnold D M, et al. Trends in the vertical distribution of ozone. *Science*, 1999, 285(5434): 1689-1692.
- [15] Rex M, Salawitch R J, Deckelmann H, et al. Arctic winter 2005: Implications for stratospheric ozone loss and climate change. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L23808-1-L23808-6.
- [16] Bhartia P K, McPeters R D, Mateer C L, et al. Algorithm for the estimation of estimation of vertical ozone profiles from the backscattered ultraviolet technique. *J Geophys Res*, 1996, 101(D13): 18793-18806.
- [17] Flynn L E, McNamara D, Beck C T, et al. Measurements and products from the solar backscatter ultraviolet (SBUV/2) and ozone mapping and profiler suite (OMPS) instruments. *Int J Remote Sens*, 2009, 30(15-16): 4259-4272.
- [18] Huang F X, Liu N Q, Zhao M X, et al. Vertical ozone profiles deduced from measurements of SBUS on FY-3 satellite. *Chin Sci Bull*, 2010, 55(10): 943-948.
- [19] Liu N Q, Huang F X, Wang W H. Monitoring of the 2011 spring low ozone events in the Arctic region. *Chin Sci Bull*, 2011, 56(27): 2893-2896.
- [20] Huang Y, Wang S R, Lin G Y. UV-VUV spectral irradiance responsivity calibration for space remote sensing spectroradiometer. *Proc SPIE*, 2007, 6829: 68290F-1-68290F-7.
- [21] Richter M, Hollandt J, Kroth U. Source and detector calibration in the UV and VUV at BESSY II. *Metrologia*, 2003, 40(1): 107-110.
- [22] Cebula R P, Park H, Heath D F. Characterization of the Nimbus-7 SBUV radiometer for the long-term monitoring of stratospheric ozone. *J Atmos Ocean Technol*, 1988, 5(2): 215-227.
- [23] 廖国男, 郭彩丽, 周诗健. 大气辐射导论(第二版). 北京: 气象出版社, 2004.
- [24] Bhartia P K, Klenk K F, Fleig A J, et al. Algorithm for vertical ozone profile determination from the Nimbus-4 SBUV dataset. In *Proc 4th Conf Atmos Radiation*. Boston: Amer Meteorol Soc., 1981.
- [25] Fleig A J, Klenk K F, Bhartia P K, et al. Vertical ozone profile results from the Nimbus-4 SBUV data. In *Proc 4th Conf Atmos Radiation*. Boston: Amer Meteorol Soc, 1981.
- [26] Klenk K F, Bhartia P K, Fleig A J, et al. Vertical ozone profile determination from Nimbus-7 SBUV measurements. In *Proc 5th Conf Atmos Radiation*. Baltimore: Amer Meteorol Soc, 1983.
- [27] Rodgers C D. Characterization and error analysis of profiles retrieved from remote sounding measurements. *J Geophys Res*, 1990, 95(D5): 587-5595.
- [28] 黄富祥, 赵明现, 杨昌军, 等. 风云三号卫星紫外臭氧垂直廓线反演算法及对比反演试验. *自然科学进展*, 2008, 18: 1136-1142.
- [29] NASA. Nimbus 7 Solar Backscatter Ultraviolet (SBUV) ozone products user's guide. Washington: NASA, 1990.